

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
Katedra energetiky

Separátor a přehříváč v jaderné elektrárně
Separator and Preheater in Nuclear Power Station

Student:

Jiří Janeček

Vedoucí práce:

prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2010

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb.- autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce.
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřou licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla naloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis

Jiří Janeček

Jiráskovo náměstí č. 4

Prostějov 796 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JANEČEK, J. *Separátor a přehříváč v jaderné elektrárně: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 50 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Bakalářská práce se zabývá horizontálními a vertikálními separátory a přehříváči páry pro jaderné elektrárny III+ generace středních a vyšších výkonů. V první části je popsán negativní vliv vlhkosti v páře na termodynamickou účinnost turbínového stupně, účinnost parního oběhu a na lopatky turbíny, dále metody odstraňování vlhkosti a popis jednotlivých typů horizontálních a vertikálních separátorů a přehříváčů. Ve druhé části je proveden tepelný výpočet dvoustupňového vertikálního separátoru - přehříváče pro jaderné elektrárny o výkonu 70 MWe. V závěru je provedeno zhodnocení výsledných hodnot. Součástí práce je schématické zapojení zařízení v parním oběhu a výkresová dokumentace kazety přehříváče.

Klíčová slova: separátor - přehříváč, vlhkost, zvyšování účinnosti, koeficient rezervy

ANNOTATION OF THESIS

JANEČEK, J. *Separator and preheater in nuclear power station: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2010, 50 p. Head of thesis: Kolat, P.

This bachelor thesis is particularly focused on horizontal and vertical steam separators and preheaters used in nuclear power stations of generation III+ of medium and higher power output. First part challenges negative influence of moisture in steam and description of this influence on thermodynamic efficiency of turbine stage, efficiency of steam cycle and on the turbine blade. Furthermore the methods of moisture removal and description of separate types of horizontal and vertical separators and preheaters. Second part consists of thermal calculation of two-stage vertical separator – preheater designed for nuclear power stations of 70 MWe power output. In conclusion I present analysis and review of final values. At last, schematic diagram of device in steam cycle and graphical documentation of preheater cassette is enclosed.

Keywords: separator - preheater, moisture, efficiency raising, coefficient of reserve

Obsah

	strana
Seznam použitého značení, zkratk a jednotek.....	7
1. Úvod.....	9
2. Separace a přehřívání páry.....	10
2.1 Expanze syté páry v turbíně.....	10
2.2 Eroze lopatek a snížení účinnosti turbínového stupně.....	11
2.3 Způsoby zmírnění škodlivých účinků vodník kapek.....	13
3. Separátory a přehříváče páry.....	13
3.1 Vnitřní odlučovačky.....	13
3.2 Vnější odlučovačky.....	13
3.3 Přehříváče páry.....	16
3.4 Separátory – přehříváče pro jaderné elektrárny.....	17
3.5 Konstrukční provedení kombinovaných SPP.....	18
3.5.1 Typy vertikálních SPP.....	19
3.5.2 Typy horizontálních SPP.....	21
3.6 Výhody a nevýhody SPP.....	24
4. Tepelný výpočet.....	25
4.1 Technický popis zařízení.....	25
4.2 Výpočet 1. stupně přehříváče.....	27
4.2.1 Hodnoty odečtené z tabulek.....	27
4.2.2 Vlastní tepelný výpočet 1. stupně přehříváče.....	28
4.3 Výpočet 2. stupně přehříváče.....	37
4.3.1 Hodnoty odečtené z tabulek.....	37
4.3.2 Vlastní tepelný výpočet 2. stupně přehříváče.....	38
5. Závěr.....	46
6. Seznam použité literatury.....	48
7. Přílohy.....	49

Seznam použitého značení, zkratek a jednotek

Značka	Popis	Jednotka
E	koeficient efektivnosti žebra	1
H_v	výpočtová plocha	m^2
H_s	skutečná plocha	m^2
L_{tr}	délka ožebrované části trubky	m
L_s	skutečná délka trubky	m
L_v	výpočtová délka trubky	m
Nu	Nusseltovo kritérium	1
Pr	Prandtlovo kritérium	1
Q	tepelný výkon	W
Re	Reynoldsovo kritérium	1
S_h	plocha hladké části trubek	m^2
S_{kt}	teoretický průřez kazety	m^2
S_{ks}	skutečný průřez kazety	m^2
S_z	plocha žeber	m^2
d	průměr trubky	m
d_e	ekvivalentní průměr	m
f_c	průřez krycích plechů	m^2
h	výška žebra	m
i	entalpie páry	$kJ \cdot kg^{-1}$
k	prostup tepla	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
k_r	koeficient rezervní plochy	%
l	rozvin délky koryta vytvořeného žebry	m
l_v	výparné teplo	$kJ \cdot kg^{-1}$
l_k	teoretická strana kazety	m
m	hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
n_{tr}	počet trubek	1
p	tlak páry	Pa
q	měrný tepelný tok	$W \cdot m^{-2}$
t	teplota páry	$^{\circ}C$

Δt	střední logaritmický spád	$^{\circ}\text{C}$
u	omývaný obvod stupně přehříváče	m
u_p	omývaný obvod přepážek	m
u_d	omývaný obvod desek	m
w	rychlost páry	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
x	suchost páry	1
z	počet	1
α	součinitel přestupu tepla	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
δ	tloušťka žebra	m
ε	koeficient znečištění	1
λ	součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
η	dynamická viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	kinematická viskozita	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
π	Ludolfovo číslo	1
ϑ	měrný objem páry	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$
ψ	koeficient nerovnoměrnosti přestupu tepla po povrchu žebra	1
μ	koeficient rozšíření žebra k základu	1

Dolní indexy

d	deska
k	kazeta
p	přepážka
s	skutečná
t	teoretická
tr	trubka
v	výpočtová

Zkratky

NT	nízkotlaká
SPP	separátor – přehříváč páry
VT	vysokotlaká

1. ÚVOD

Rozvoj energetiky má rozhodující význam pro národní hospodářství každého státu. Vzhledem k tomu, že spotřeba elektrické energie neustále roste, kladou se také vyšší nároky na její výrobu. Z výzkumů světové rady pro energii (WEC) vyplývá, že spotřeba elektrické energie se v příštích 25 letech zdvojnásobí. Emise CO_2 by tedy mohly stoupnout až o 100%. Výroba energie je podmíněna zásobami primárních energetických zdrojů jako je uhlí, ropa, zemní plyn a v neposlední řadě také uran. Vzhledem k tomu, že zdroje uhlí a uranu jsou poměrně rovnoměrně rozprostřeny po celé planetě, u ostatních paliv je situace jiná. Např. Saudská Arábie drží 20% světových zásob ropy, Ruko, Írán a Katar kontroluje zase asi 60% veškerých zásob zemního plynu. Takže státům, které nechtějí být závislé na dodávkách paliva ze zahraničí nezbyvá nic jiného, než se orientovat na uhlí a uran. Ovšem vzhledem k velké produkci CO_2 při spalování uhlí v elektrárnách na fosilní paliva se dá říci, že jaderná energie je v tomto ohledu tím nejlepším řešením. Jaderná energie neprodukuje prakticky žádné tzv. skleníkové plyny a tak významně přispívá ke snížení globálních emisí těchto plynů do ovzduší a navíc také patří všude ve světě mezi nejlevnější energetické zdroje, což se také odráží v cenách elektřiny vyrobené prostřednictvím štěpení jádra.

Jaderná energetika se stala přirozenou součástí energetického mixu každého vyspělého státu, mezi něž patří i Česká republika. Bez ohledu na to jaký typ reaktoru bude zvolen lze předpokládat, že jaderné elektrárny budou mít zásadní vliv na rozvoj ekonomiky i v budoucnu. [9]

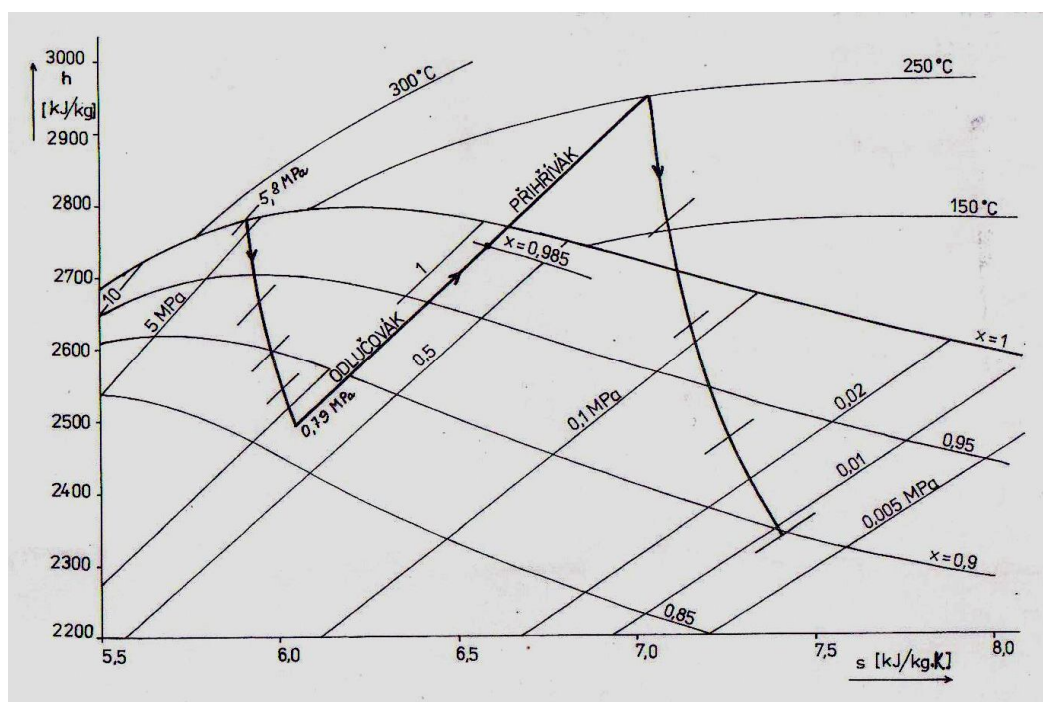
Při výrobě elektrické energie je snaha vyrábět tuto co nejefektivněji, a proto je třeba věnovat zvýšenou pozornost prvkům, které ovlivňují hospodárnost výroby elektrické energie. Jedním z těchto prvků je také separátor – přihřívač páry (SPP) určený pro parní turbínu.

Cílem této práce je popis základních principů funkce jednotlivých typů horizontálních a vertikálních separátorů – přihřívačů pro jaderné elektrárny III+ generace středních a vyšších výkonů a návrh vertikálního SPP pro jaderné elektrárny o výkonu 70 MWe. Návrh zahrnuje tepelný výpočet prvního a druhého stupně přihřívače podle zadaných hodnot páry vystupující ze separátoru.

2. SEPARACE A PŘIHRÍVÁNÍ PÁRY

2.1 EXPANZE SYTÉ PÁRY V TURBÍNĚ

Turbíny na sytou páru jsou v současné době na světě nejrozšířenějším typem turbín v jaderných elektrárnách. Při expanzi páry v turbíně se snižuje její suchost, tzn. že se zvětšuje vlhkost páry. S každým procentem vlhkosti klesá termodynamická účinnost příslušného stupně turbíny a zvyšuje se nebezpečí erozního a korozního působení na lopatky turbíny. Vlhkost páry při expanzi by neměla překročit 13 až 14%. Poklesne-li suchost páry na hodnotu zhruba 0,87, tak musíme expanzi v první (vysokotlaké) části turbíny ukončit a zbavit jí vlhkosti než vstoupí do druhé (nizkotlaké) části turbíny.



obr. 2.1 Expanze páry v turbíně na sytou páru o výkonu
1000MW se separátorem - přehříváčem páry - podle [8]

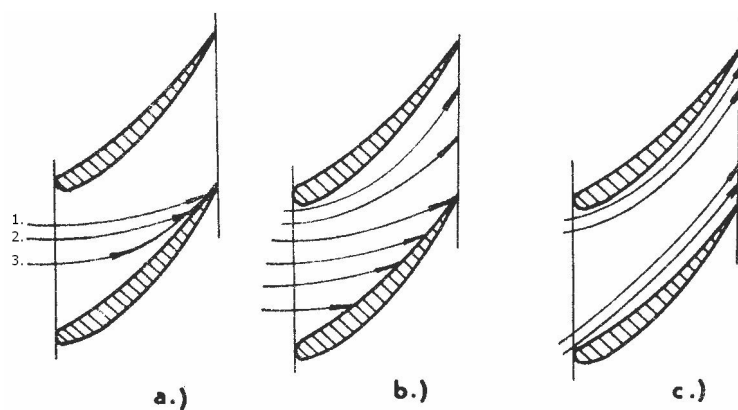
Jako nejlepší způsob odstraňování vlhkosti se jeví separace. Odstraňování vlhkosti se provádí v odlučováku (separátoru) vlhkosti. Tyto odlučováky jsou pro jaderné elektrárny nejčastěji kombinovány s přehříváči páry. Přehřívání páry je jeden z velice účinných způsobů zvyšování termodynamické účinnosti turbíny a tím také účinnosti

celého parního cyklu. Pára vystupující z odlučovačku má vlhkost okolo 1%, zavádí se do přehříváče a následně tato přehřátá pára expanduje v NT části turbíny. Příklad expanze páry v turbíně s následnou separací a přehříváním páry je znázorněn na obr. 2.1.

Pára může být přehřívána cizím zdrojem (klasickým palivem), chladičem reaktoru, nebo vstupní popř. odběrovou parou z turbíny. Provedení přehříváčů může být jednostupňové nebo dvoustupňové. Stejně tak odlučovače bývají konstruovány jako jednostupňové nebo dvoustupňové. Podle literatury [1] a [8].

2.2 EROZE LOPATEK A SNÍŽENÍ ÚČINNOSTI TURBÍNOVÉHO STUPNĚ

Základním negativním účinkem je tedy vlhkost, ta způsobuje erozi lopatek turbíny a snižuje termodynamickou účinnost turbínového stupně. Erozi nezpůsobují malé kapky ani mlhovina, protože ty mají velkou rychlost a pohybují se s expandující parou. Problémem jsou velké kapky, protože ty se pohybují menší rychlostí než pára a srážejí se na stěnách rozváděcích lopatek a na tělese turbíny tzn. že čím větší je rychlost kapek, tím menší je jejich škodlivý účinek. Experimentálně bylo dokázáno, že kapky o průměru $d < 1-5 \mu\text{m}$ se pohybují prakticky spolu se základním proudem páry a prochází s ním lopatkovou mříží, aniž by se dotýkaly profilu. Naopak kapky o rozměrech $d > 50-100 \mu\text{m}$ se od proudu odtrhují a to tím víc, čím mají větší průměr a přichází do kontaktu s profilem. Na obrázku 2.2 a-c jsou uvedeny jednotlivé trajektorie vodních kapek v závislosti na jejich velikosti. Ke snížení termodynamické účinnosti dochází vlivem velkých vodních kapek, které mají větší setrvačnou hmotnost než pára, odtrhávají se od proudu páry, naráží do lopatek a tím tyto lopatky brzdí. [1]

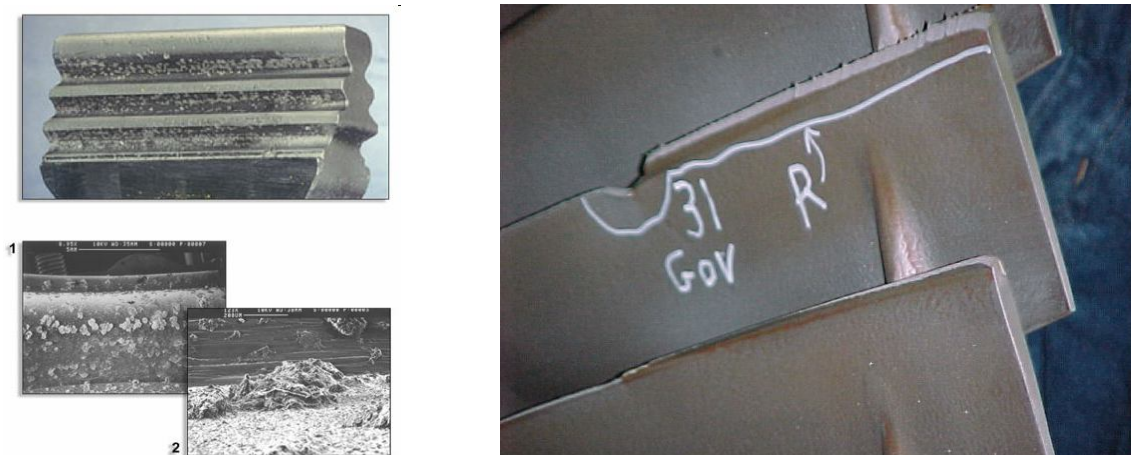


obr. 2.2 Trajektorie vodních kapek v lopatkové mříži - podle [1]

Trajektorie vodních kapek v lopatkové mříži – popis obr. 2.2

- a) kapky na vstupu nejsou stejné velikosti
1. $d = 1 \quad [\mu m]$
 2. $d = 20 \quad [\mu m]$
 3. $d = 200 \quad [\mu m]$
- b) kapky na vstupu mají stejný rozměr $d = 10 \quad [\mu m]$
- c) kapky na vstupu mají stejný rozměr $d = 2 \quad [\mu m]$

Lopatky trpí nejvíce ve třetině délky nejbližší k obvodu, protože do této oblasti se vlivem setrvačné síly soustředí převážná část kapek. Na rozváděcích i oběžných lopatkách se po nárazech kapek vytváří vodní film, který je unášen k obvodu a k výstupním hranám lopatek. S erozí vodními kapkami je také spojena koroze a to především nelegovaných ocelí. Je proto vhodné používat oceli s obsahem Cr 13 %. Někdy se také používá navařování chromové oceli na uhlíkovou ocel. Negativní vliv vlhkosti v páře na lopatky turbíny je znázorněn na obrázku 2.3.



obr. 2.3 Erozní a korozní působení na lopatky turbíny

2.3 ZPŮSOBY ZMÍRNĚNÍ ŠKODLIVÝCH ÚČINKŮ VODNÍCH KAPEK

Dělíme na:

a) aktivní

b) pasivní

Aktivní způsoby snižují obsah vody v parním proudu a nebo vhodně ovlivňují její disperzi. Naopak pasivní způsoby zvyšují odolnost povrchu proti erozi (např. povrchové kalení lopatek, připájení stelitových pásků, elektrojiskrové nanesení ochranné vrstvy z rychlořezné oceli). [1] a [8]

3. SEPARÁTORY A PŘIHŘÍVAČE PÁRY

Patří mezi aktivní způsoby odstraňování vlhkosti a u jaderných elektráren se používají nejčastěji. Následující text bude věnován popisu jednotlivých typů separátorů a přehříváčů.

3.1 VNITŘNÍ ODLUČOVÁKY

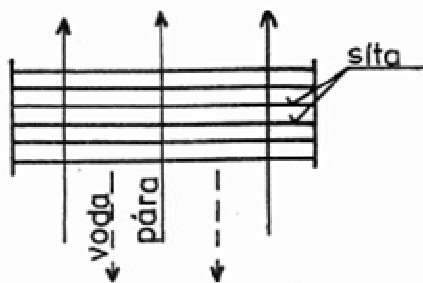
Jedná se v podstatě o nepohyblivou předřazenou mříž, pomocí níž se pára uvede do rotace a na následující dráze je odstraněna vlhkost. Poté pára vstupuje do dalšího stupně. Tato práce je zaměřena především na vnější typy odlučováků (viz dále).

3.2 VNĚJŠÍ ODLUČOVÁKY

Oproti vnitřním odlučováčkům jsou umístěny vedle turbíny. V momentě kdy pára dosáhne ještě přípustné vlhkosti, tak je vyvedena z první VT části turbíny do odlučováku a po odstranění vlhkosti je zavedena do druhé NT části turbíny k další expanzi.

a) Sítové odlučováky

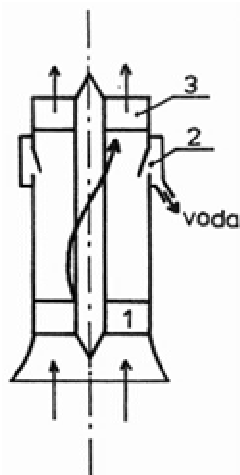
Skládá se z několika vrstev drátěných sít s malými oky, průměr drátu se pohybuje okolo 0,3-0,5 mm, umístěné horizontálně nebo s maximálním sklonem 15°. Pára prochází zespodu nahoru maximální rychlostí 1-2 m·s⁻¹. Pára je v kontaktu se sítí a kapky vody, které naráží na dráty, tak vytváří vodní film a po drátě stékají až do místa, kde se dráty křížují. Odtud kapka vody odkápne proti proudu páry. Proto musí být rychlost páry nízká, tudíž musí být separátor velkých rozměrů. Ztráta sítových odlučováků bývá velmi malá a zbytková vlhkost páry bývá nízká, okolo 0,1 - 0,2%. Princip sítového separátoru je znázorněn na obr. 3.1. [8]



obr. 3.1 Princip sítového separátoru - podle [8]

b) Cyklónové odlučováky

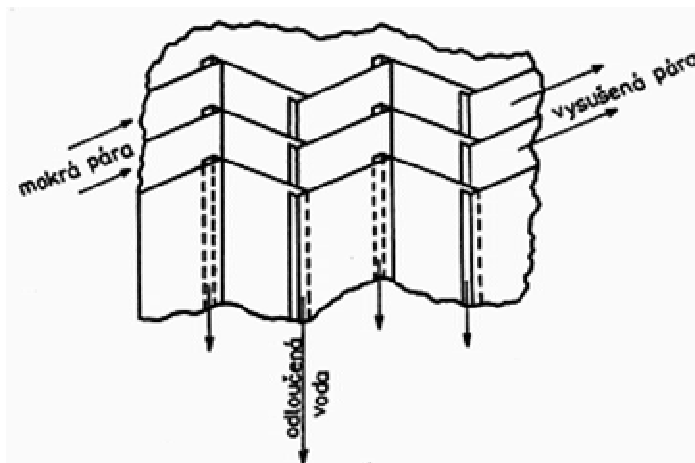
Na obrázku 3.2 je znázorněn princip cyklónového odlučováku, který spočívá v tom, že pára je uvedena do rotace díky vhodně tvarovaným nepohyblivým lopatkám, které jsou umístěny na vstupu do odlučováku. Těžší vodní kapky se díky odstředivé síly usazují na obvodu a štěrbina se odvedou. Lehčí pára potom pokračuje vzhůru ve směru osy cyklonu přes výstupní divizorové lopatky. Zde se část kinetické energie páry přemění na tlakovou. Cyklónový odlučovák má velké tlakové ztráty a zbytková vlhkost bývá okolo 1%. [8]



obr 3.2 Princip cyklónového separátoru podle [8]

c) Žaluziové odlučovák

Skládá se z vertikálně orientovaných plechů s maximálním sklonem 30° . Plechy jsou zakřiveny tak, že vytváří kruhové oblouky popř. šípové voštiny. Mokrá pára vstupuje do systému žaluzií, naráží na stěny separátoru, kde se usazuje odloučená voda a ta následně odtéká svisle dolů do sběrače odloučené vlhkosti. Někdy bývají v ohybech plechů žlábkky, které usnadňují odtékání vody. Rychlost páry by neměla překročit $1/3$ max. $1/2$ tzv. kritické rychlosti páry v odlučovaku. Při tomto překročení by mohlo dojít k trhání vodního filmu a kapky vody by se znovu strhávaly do procházející páry a účinnost odlučovaku by se prudce zhoršila. Zbytková vlhkost páry bývá u žaluziových odlučováků okolo 0,4%. V poslední době se jich stále více používá. Princip žaluziového odlučovaku je znázorněn na obr. 3.3. [8]

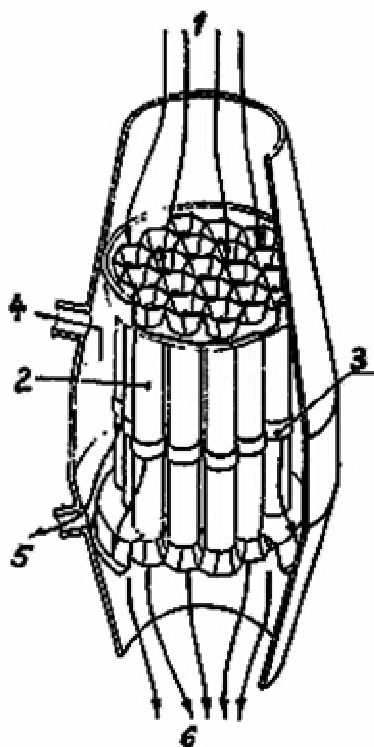


obr. 3.3 Princip žaluziového odlučovaku – podle [8]

Konstrukční provedení separátorů prošlo vývojem od síťových, přes cyklónové až po žaluziové. Správná funkce odlučovače je podmíněna rozvodem proudu mokré páry přes zachytivé plochy, aby jejich účinek odpovídal výpočtovým a funkčním předpokladům. Rychlost kapek nesmí překračovat hodnoty při kterých by docházelo k opětovnému strhávání kapek do hlavního proudu páry.

Ve francii byly však vyvinuty tzv. vysokorychlostní odlučovák na cyklónovém principu. V těchto odlučovacích může pára dosahovat rychlostí i přes $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sestává se z 19 nebo 24 těsně vedle sebe uložených cyklónů. Separátor má průměr 1,46 m, délku 4 m a hmotnost okolo 4 t.

Mokrý pára vstupuje do odlučovák v místě (1), prochází přes cyklónové elementy (2), které mají štěrbinu pro odvod vlhkosti. Těmito štěrbinami se odvede také část páry spolu s odloučenou vlhkostí, a tato tzv. drenážní pára odchází v místě (4) do regeneračního ohříváku napájecí vody. Odloučená vlhkost ze štěrbin (3) se odvádí v místě (5). Vysušená pára následně opouští separátor v místě (6). Příklad vysokorychlostního odlučovák obr. 3.4. [8]



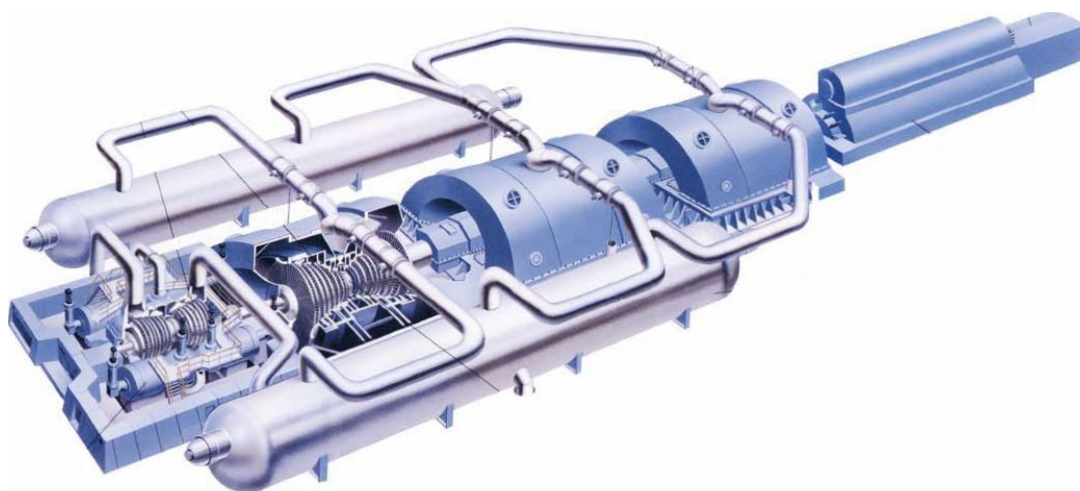
obr. 3.4 Vysokorychlostní odlučovák s 19-ti cyklónovými elementy - podle [8]

3.3 PŘIHRÍVAČE PÁRY

Přihříváč páry může být konstruován jako jednostupňový nebo dvoustupňový. Přihříváč se sestává ze šestihranných kazet, které jsou uloženy v oporné mříži. Každá kazeta je tvořena podélně ožebrovanými trubkami, kde žebro má žlábkový profil, který je přivařen k trubce. Konce trubek jsou spojeny do svazku a upevněny v trubkovnici. Každý přihříváč má vstupní hrdlo pro přívod přihříváné páry a výstupní hrdlo pro odvod přihřáté páry s požadovanými parametry. [3]

3.4 SEPARÁTOR - PŘIHRÍVAČ PÁRY (SPP) PRO JADERNÉ ELEKTRÁRNY

V jaderných elektrárnách, které pracují se sytou párou se používají turbíny se separátory spojenými s přehřívací párou. Jedná se v podstatě o válcovou nádobu, ve které je umístěn síťový nebo žaluziový separátor a zbylé místo se využívá pro přehříváč páry. Většina konstrukcí je uložena ve společném tělese válcového tvaru. Bývají umístěny co nejbližší turbíně, aby docházelo k co nejmenším tlakovým ztrátám. Každá turbína má většinou dvě taková zařízení situované na podlaze vedle turbínu ve vertikální popř. horizontální poloze. Umístění horizontálních SPP je na obr. 3.5.



obr. 3.5 Umístění horizontálních SPP na podlaze vedle turbíny

Mokrá pára po průchodu VT částí turbíny je vyvedena do systému separujících komor ve spodní části SPP, kde dochází k odstranění vlhkosti z páry. Vlhkost je po vyloučení na povrchu desek odvedena do ohříváče vody. Pára potom vstupuje do horní části, kde dochází k dalšímu odstraňování vlhkosti a následnému přehřívání páry.

Rychlost páry v separátoru bývá okolo $10\text{--}15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ z důvodů účinnosti zařízení. Rozměry těchto zařízení jsou velmi velké a celé zařízení je vysoce nákladné. Před NT dílem turbíny musí být umístěn záchytný ventil, protože SPP pojímají velké množství páry, které by v případě náhlého odlehčení mohlo způsobit značné roztočení turbíny.

Pára se přehřívá parou ostrou nebo parou z neregulovaného odběru. Pro přehřívání se z bezpečnostních a ekonomických důvodů nepoužívá primární voda. Přehříváče mívají nejčastěji trubkové uspořádání. V těchto trubkách ostrá pára kondenzuje. Trubkami musí protékat větší množství ostré páry než stačí zkondenzovat, to zaručuje ventilaci trubek. Vnější povrch bývá ožebrováný. Trubky přehříváku jsou nejčastěji vyráběny z materiálu CuNi 70/30 až 90/10, popř. z nerezavějící oceli, ale to jen méně často. Teplota na povrchu SPP nesmí z bezpečnostních důvodů překročit hodnotu 45°C, proto je toto zařízení opatřeno vnější izolací. [1] a [3]

3.5 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ KOMBINOVANÝCH SPP

Konstrukční provedení odlučováků a přehříváčů bývá takové, aby mohly být umístěny do jedné válcové nádoby a to buď:

- a) vertikálně
- b) horizontálně

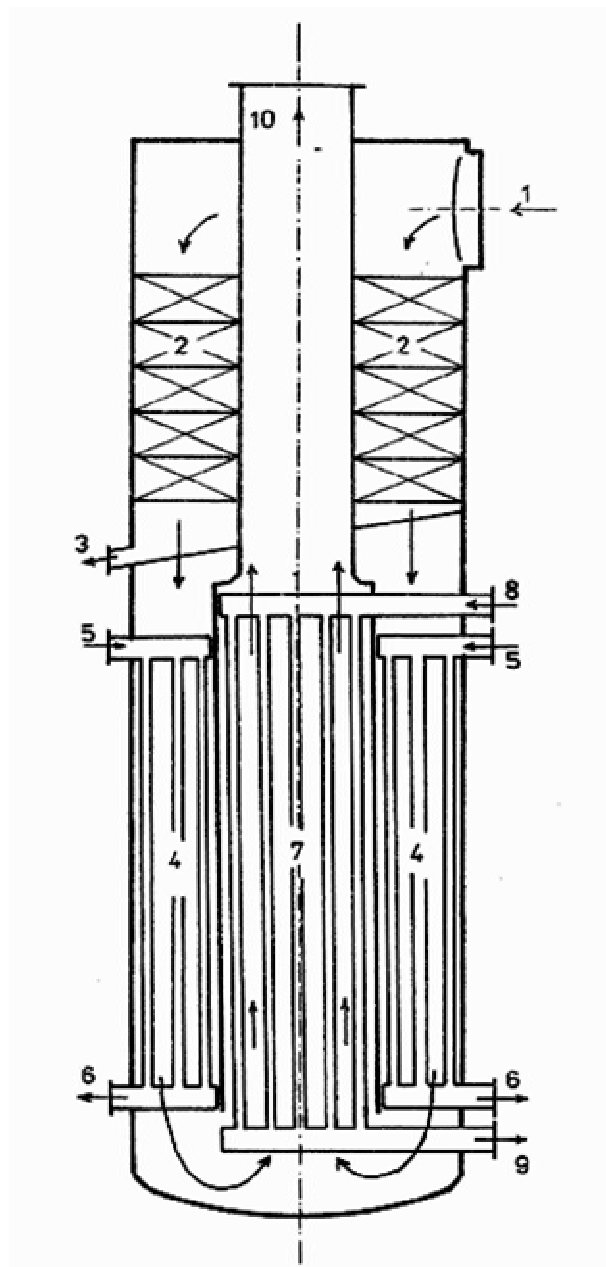
Vertikální uspořádání s sebou nese úsporu místa. Ovšem velké problémy jsou např. s umístěním žaluzií. Odlučovací elementy musí být vyměnitelné a proto se klade velký důraz na snadnou a co nejméně nákladnou demontáž jednotlivých dílů.

Horizontální uspořádání je náročnější z hlediska úspory místa. Umístění síťových a žaluziových separátorů bývá poměrně snadné a přívodní potrubí k nízkotlakým částem je kratší než u vertikálních typů. [8]

3.5.1 TYPY VERTIKÁLNÍCH SPP

a) Separátor – přehříváč páry pro turbínu ŠKODA K 220 – 44

SPP na obrázku 3.6 je používán na elektrárnách VVER 440 a je vyráběn slovenskými strojírnami v Tlmačích. Válcová nádoba má průměr 3,48 m a výšku 14 m. Každá turbína má dva tyto SPP a jsou umístěny před vysokotlakou částí turbíny.



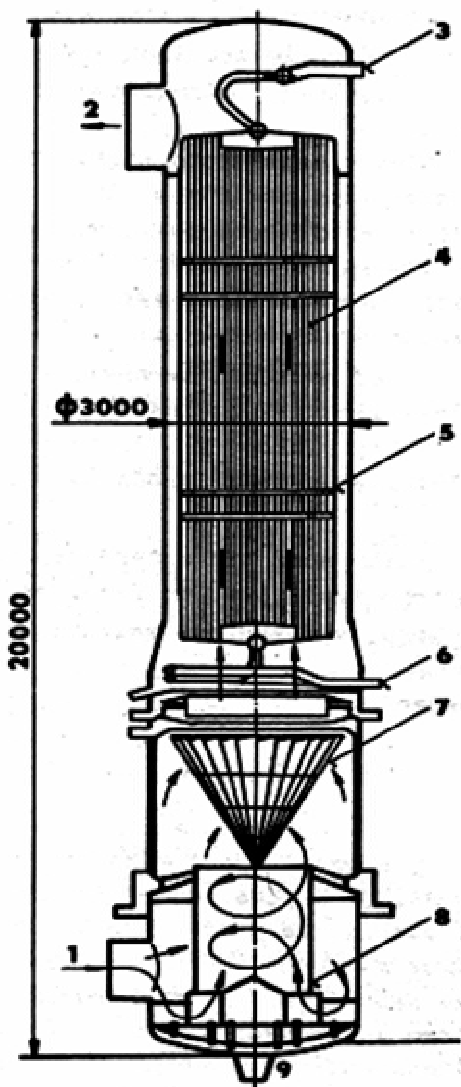
Mokrý pára vstupuje hrdlem (1) po expanzi ve vysokotlaké části turbíny do odlučováku při tlaku 0,49 MPa a o vlhkosti 13%. V množství 492 t/h. Pára proudí přes kazety žaluziového odlučováku označené (2). Odtud se odstraněná vlhkost odvádí hrdlem (3). Pára následně proudí do prvního stupně přehříváče, který je tvořen svislými podélně ožebrovanými trubkami (4). Trubky mají průměr 16 mm a tloušťku stěny 2 mm a jsou v kazetách po 37 kusech. Kondenzující pára ze VII. odběru turbíny je přiváděna v místě (5) a její kondenzát je odváděn místem (6). Přehřívaná pára proudí podél vnějšího povrchu ožebrovaných trubek dolů a následně se obrací o 180° a proudí směrem vzhůru do druhého stupně přehříváče (7). Topná pára pro druhý stupeň vstupuje v místě (8) a její kondenzát vystupuje v místě (9). Vysušená a přehřátá pára odchází v místě (10) při tlaku 0,46 MPa a teplotě 261 °C [8]

obr. 3.6 Schematický náčrt SPP pro
turbínu Škoda K 220-44 – dle [8]

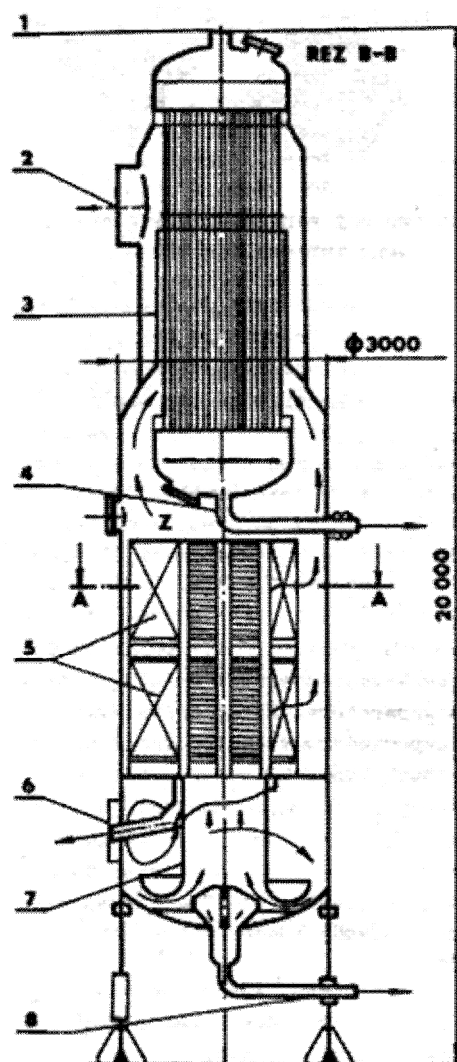
b) Separátor - přehříváč páry typ STADE

Další typ vertikálního SPP s výškou 20m a průměrem 3m. Toto zařízení je zobrazeno na obrázku 3.7.

Mokrá pára vstupuje hrdlem (1) do spodní části SPP, prochází cyklónovým separátorem (8), kde se částečně odstraní vlhkost, která odchází v místě (9). Pára dále vertikálně vstupuje do separátoru (7). Po průchodu tímto separátorem vstupuje do přehříváku (4), kde je přehřívána ostrou parou vstupující bodem (3). Kondenzát odchází v místě (6). Vysušená a přehřátá pára opouští SPP v místě (2). [1]



obr. 3.7 Vertikální SPP typ STADE
podle [1]



obr 3.8 Vertikální SPP typ
STEIMÜLLER - podle [1]

c) Vertikální separátor - přehříváč systém STEINMÜLLER

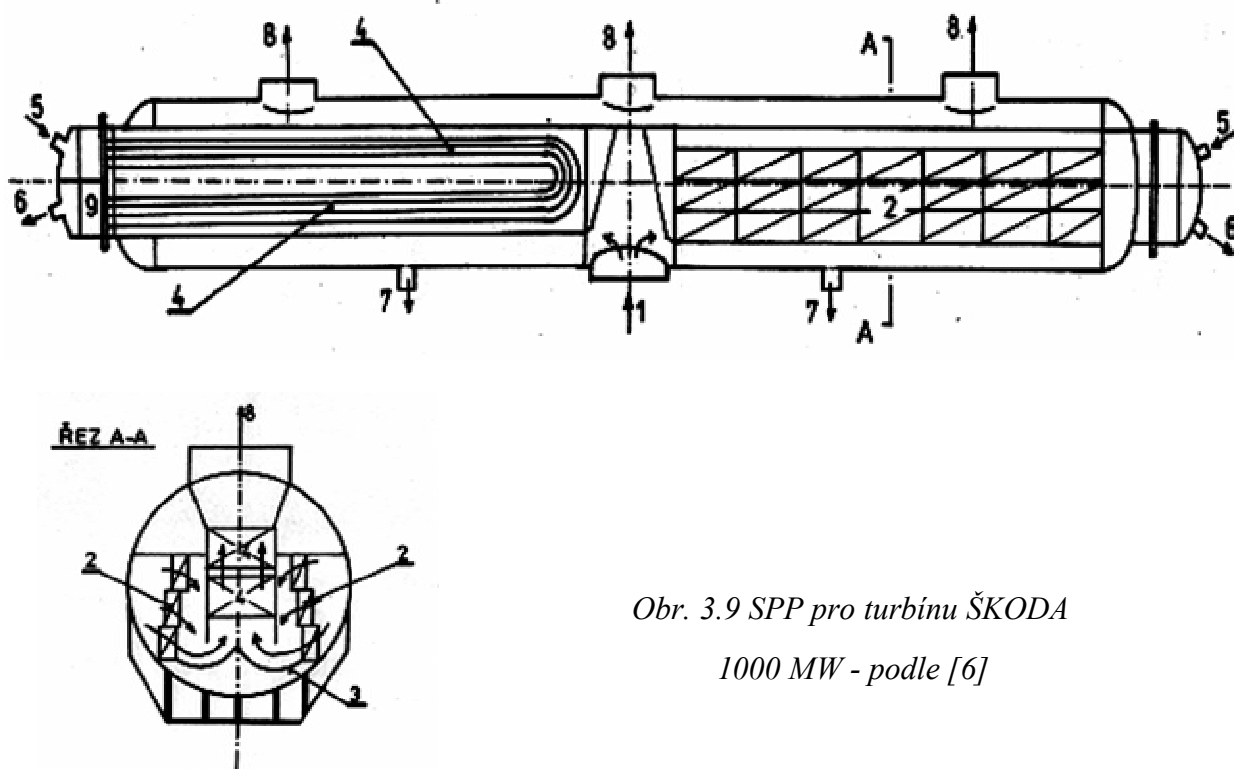
Celková výška tohoto SPP je 20m s vnějším průměrem válcové nádoby 3m. Přehříváč páry je trubkového uspořádání, separátor žaluziový. Používá se pro turbínu s výkonem 1200 MW a většinou má turbína dva tyto SPP. Pára vstupuje do separátoru-přehříváče při tlaku 1,08MPa, s vlhkostí 13% a množstvím 2750 t/h. Teplota páry na výstupu je 220°C a konečná vlhkost 0,5%. Systém STEINMÜLLER je zobrazen na obrázku 3.8 (viz výše).[1]

3.5.2 TYPY HORIZONTÁLNÍCH SPP

a) Separátor - přehříváč páry pro turbínu na sytou páru ŠKODA 1000MW

Někdy také nazýván SPP 1000. Tento typ je zobrazen na obrázku 3.9. Používá se na našich jaderných elektrárnách s reaktory VVER 1000. Jedná se o válcovou nádobu o průměru 3,5 m a celkové délce 32 m. Každá turbína má dva tyto SPP a jsou umístěny na podlaze turbíny, rovnoběžně s její osou.

Tlak mokré páry na vstupu do SPP je 0,79 MPa, pro turbíny 220 MW je vstupní tlak 0,49 MPa.



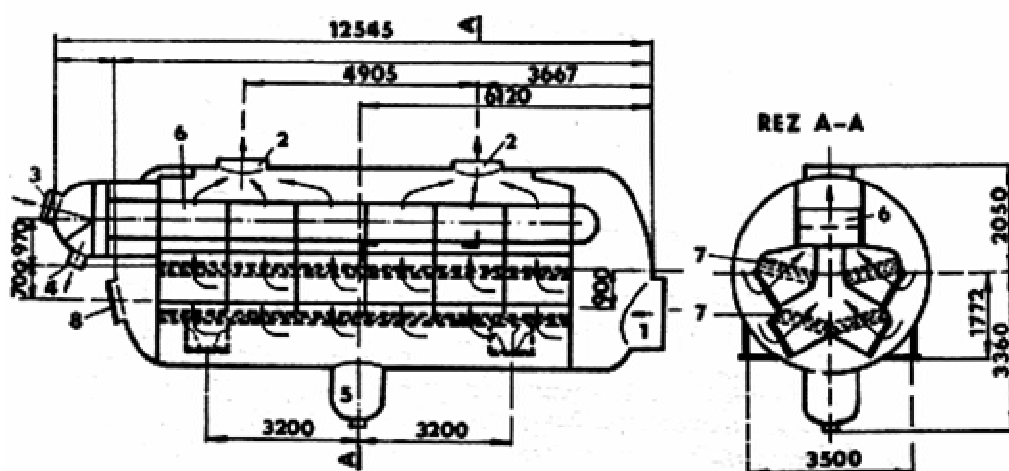
Obr. 3.9 SPP pro turbínu ŠKODA
1000 MW - podle [6]

Mokrý pára po expanzi ve vysokotlaké části turbíny vstupuje hrdlem (1) a rozděluje se na obě strany, celkem na 4 proudy (na každou stranu 2). Dále prochází kazetami (2) žaluziového odlučovače, které jsou umístěny ve 3 patrech nad sebou. Pracovní pára se zavede do přehříváku páry (4) prostřednictvím speciálně tvarovaných vodících plechů (3). Přehříváč páry je trubkové konstrukce tvaru U. Ostrá pára pro přehřev je přiváděna v místě (5) a její kondenzát je odváděn v místě (6). Společné uložení žaluziového separátoru a trubkového přehříváku znázorňuje řez A-A. Odloučená vlhkost z pracovní páry je odváděna v místě (7). Přehřátá a vysušená pára se odvádí třemi hrdly (8) v horní části SPP k další expanzi do 3 nízkotlakých těles turbíny.

Část nezkondenzované topné páry pro přehřev pracovní páry se odvádí v místech (9), protože při konstrukci SPP 1000 se tvořily vodní zátky v koncových částech trubek přehříváče, což způsobovalo nepříjemné pulsace. [6]

b) Horizontální síťový separátor - přehříváč systém SULZER-MÜHLEBERG

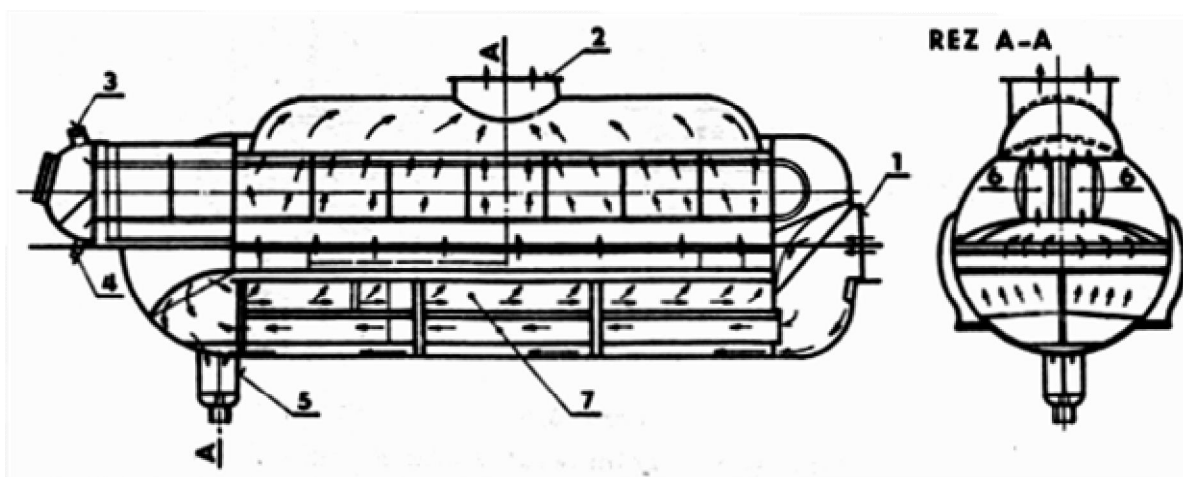
Základní schéma a rozměry tohoto zařízení jsou uvedeny na obrázku 3.10. Mokrý pára vstupuje hrdlem (1) a prochází přes síťové odlučovače (7), kde se z pracovní páry odstraňuje vlhkost, která se shromažďuje ve sběrači (5). Dále pára prochází přes přehříváč páry (6) do kterého je přiváděna topná pára v místě (3) a její kondenzát vystupuje v místě (4). Vysušená a přehřátá pára odchází dvěma hrdly (2) v horní části zařízení. [1]



obr. 3.10 Horizontální SPP SULZER-MÜHLEBERG - podle [1]

c) Horizontální separátor - přehříváč pro turbogenerátor BBC systém WECO

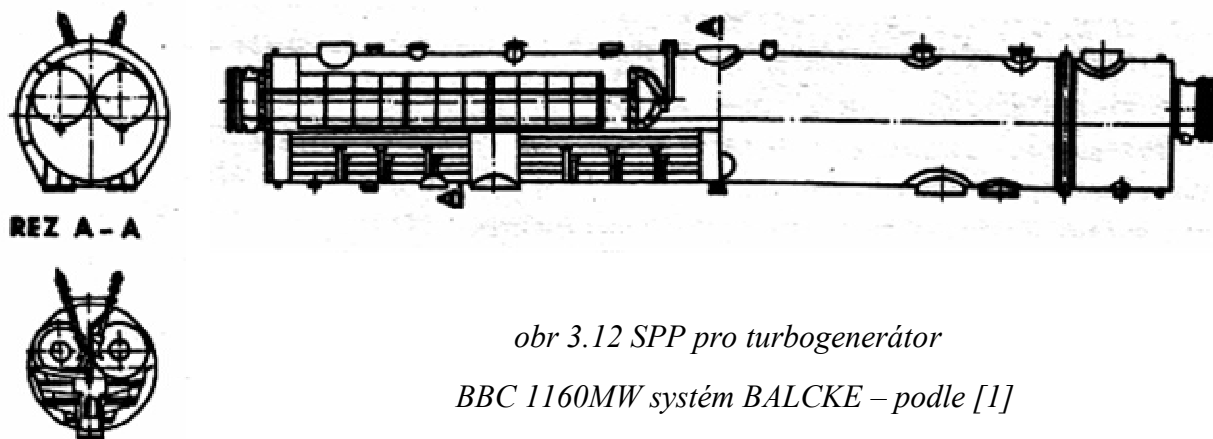
Schématický náčrt tohoto zařízení je znázorněn na obrázku 3.11. Mokrá pára vstupuje hrdlem (1) a prochází přes segmenty odlučovače (7), kde dochází k odloučení vlhkosti. Tato odstraněná voda se shromažďuje ve sběrači (5). Pára dále vertikálně stoupá do přehříváče (6), topná pára je přiváděna místem (3) a její kondenzát je odváděn místem (4). Vysušená a přehřátá para následně vystupuje hrdlem (2) v horní části zařízení. [1]



obr. 3.11 Horizontální SPP pro turbogenerátor BBC systém WECO - podle [1]

d) Separátor - přehříváč pro turbogenerátor BBC 1160MW systém BALCKE

U tohoto systému se vlhkost odlučuje v drátěných sítích. Přehřívání páry může být i dvoustupňové. První stupeň pracuje buď s odběrovou parou, druhý s parou ostrou. Turbogenerátor má většinou dva jednostupňové přehříváče na ostrou páru. Průměr SPP BALCKE je 4 m a má výšku 39 m. Princip činnosti odpovídá výše uvedeným typům a je patrný také z obrázku 3.12. [1]



*obr 3.12 SPP pro turbogenerátor
BBC 1160MW systém BALCKE – podle [1]*

3.6 VÝHODY A NEVÝHODY SEPARÁTORŮ – PŘIHRÍVAČŮ

Používáním přihřívачů na ostrou páru se dosahuje zlepšení měrné spotřeby tepla asi o 1,5 %. Při netěsnostech přihřívачe nevznikají žádné vážnější problémy ani s radioaktivní parou. Vstupní pára do NT turbíny je přehřátá a má přesně určený stav, koncová vlhkost NT turbíny je 8-10 %, což je nižší než u turbín, pracujících v elektrárnách na fosilní paliva.

Naopak nevýhodou těchto zařízení je, že zabírají ve strojovnách spoustu místa, z hlediska své rozsáhlé konstrukce, a jejich vysoká cena. Vyžadují delší potrubí na přívod a odvod páry. Pojímají velké objemy páry a při náhlém odlehčení by mohlo dojít k roztočení turbíny velkými otáčkami, proto musí být opatřovány pojistným ventilem před vstupem do nízkotlaké části turbíny. [1]

Zobrazení některých typů horizontálních a vertikálních SPP v barevném provedení a fotografie z instalace zařízení viz příloha č. 1.

4. TEPELNÝ VÝPOČET

Cílem tohoto tepelného výpočtu je u zadaného typu SPP stanovit hodnotu koeficientu rezervní plochy k_r [%] v prvním a druhém stupni přehříváče. Tato rezerva slouží pro případnou opravu částí přehříváče zaslepováním trubek. Minimální hodnota koeficientu musí dosahovat alespoň 10 %. Návrh odlučovače není součástí výpočtu.

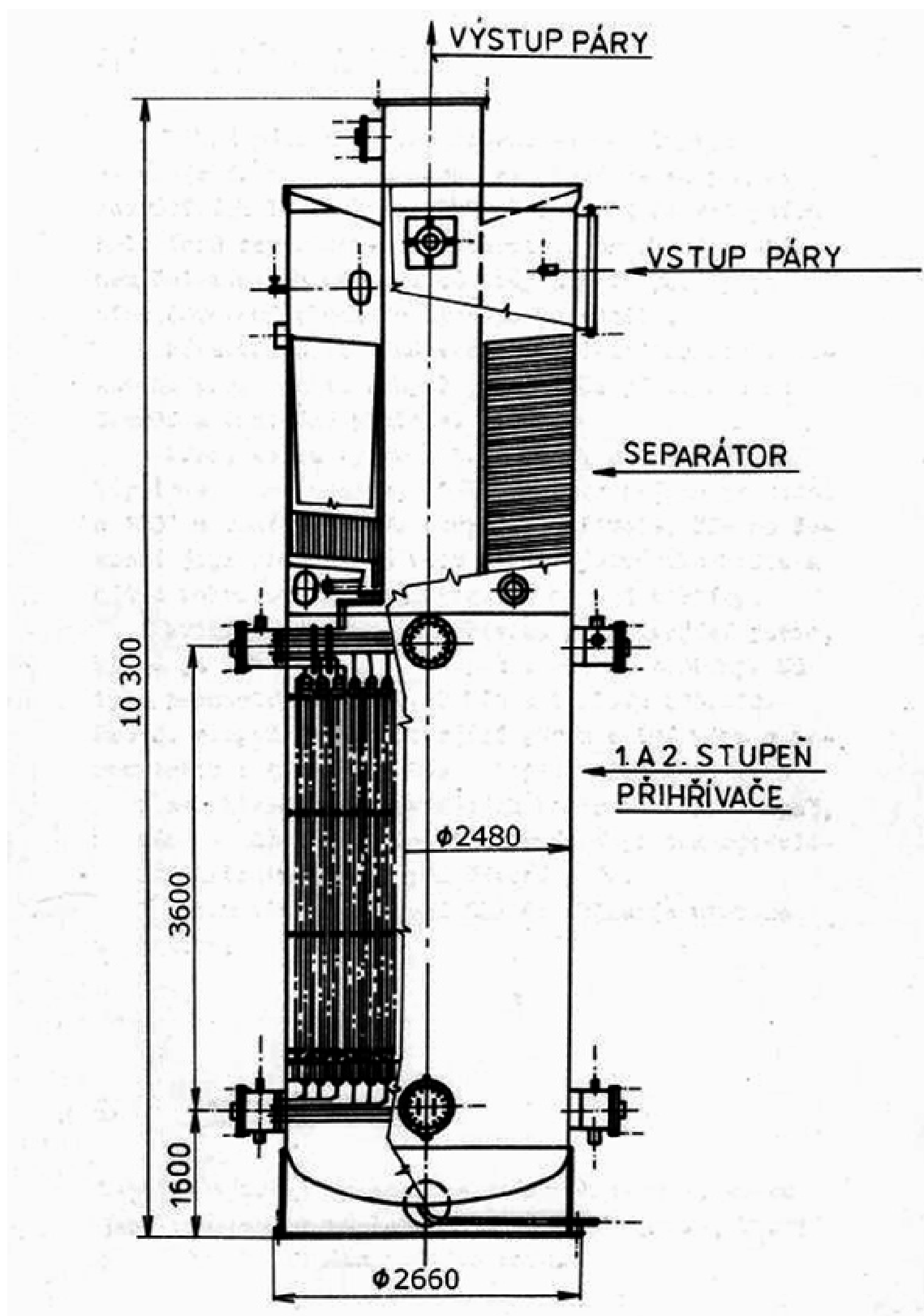
4.1 TECHNICKÝ POPIS ZAŘÍZENÍ

Pro vlastní výpočet byl vybrán vertikální typ SPP pro jaderné elektrárny o výkonu 70 MWe. Princip činnosti je shodný s vertikálním zařízením pro turbínu ŠKODA K 220 – 44 a byl popsán v kapitole 3.5.1. Schématický náčrt se zakótováním základních rozměrů je uveden na obrázku 4.1.

SPP je válcová nádoba, ve které je umístěn žaluziový separátor a dva stupně přehříváče. Každá turbína má dvě tato zařízení a jsou umístěny co nejblíže turbíně, aby bylo zamezeno případným tlakovým ztrátám a snížení parametrů vstupní a výstupní páry, potažmo účinnosti parního cyklu. Zapojení obou SPP do oběhu (viz příloha č.3) .

Separátor se sestává ze 16 stejných separátorových bloků uložených v kruhovém prostoru mezi stěnou válcové nádoby a trubkou pro výstup přehřáté páry ze 2. stupně v horní části zařízení. Dále obsahuje vnitřní záchytný kolektor a dvě trubky pro odvod odloučené vlhkosti. Vlastní separátorový blok se skládá z pěti odlučovacích svazků. Každý svazek je tvořen vodícími lopatkami, žaluziemi a děrovaným plechem. Princip činnosti žaluziového separátoru byl popsán v kapitole 3.2.

Výhřevná plocha přehříváče je tvořena šestihrannými kazetami (viz příloha č.2). stojícími v oporné mříži a jsou umístěny v dolní části nádoby. V kazetě je umístěno 37 podélně ožebrovaných trubek. Ke každé trubce je přivařeno 6 žlábkových profilů, které dohromady tvoří 12 žeber. Konce trubek jsou spojeny do svazku a upevněny v trubkovnici. První stupeň přehříváče tvoří 30 kazet jsou rozloženy po obvodu nádoby. Uvnitř prvního stupně je umístěno 29 kazet druhého stupně. Oba stupně jsou od sebe odděleny tvarovou přepážkou tzv. mezistěnou. [3]



obr. 4.1 Schéma vertikálního SPP pro jaderné elektrárny o výkonu 70MWe

4.2 VÝPOČET PRVNÍHO STUPNĚ PŘIHRÍVAČE

Zadané hodnoty:

$p_1 = 0,2972$	[Mpa]	Tlak přehřívání páry na vstupu do 1. stupně
$t_1 = 133$	[°C]	Teplota přehřívání páry na vstupu do 1. stupně
$p_2 = 0,288$	[Mpa]	Tlak přehřívání páry na výstupu z 1. stupně
$t_2 = 186,2$	[°C]	Teplota přehřívání páry na výstupu z 1. stupně
$p_4 = 1,76$	[Mpa]	Tlak ohřívající páry pro 1. stupeň
$t_4 = 216$	[°C]	Teplota ohřívající páry pro 1. stupeň
$m_1 = 88,89$	[kg·s ⁻¹]	Množství vlhké páry vystupující ze separátoru

4.2.1 HODNOTY ODEČTENÉ Z TABULEK

Všechny potřebné hodnoty byly odečteny z tabulek uvedené v literatuře [4].

Entalpie páry pro 1. stupeň

$i_1 = 2751$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie přehřívání páry na vstupu do 1. stupně
$i_2 = 2853$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie přehřívání páry na výstupu z 1. stupně
$i_4 = 2911$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie ohřívající páry pro 1. stupeň
$i_5 = 859$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie kondenzátu ohřívající páry pro 1. stupeň

Fyzikální konstanty ohřívající páry:

$\eta_5 = 134,5 \cdot 10^{-6}$	[Pa·s]	Dynamická viskozita kondenzátu pro 1. stupeň
$l_{v5} = 1917,2$	[kJ·kg ⁻¹]	Výparné teplo kondenzátu pro 1. stupeň
$\lambda_5 = 66,02 \cdot 10^{-2}$	[kJ·kg ⁻¹]	Tepelná vodivost kondenzátu pro 1. stupeň
$Pr_5 = 0,9236$	[1]	Prandtlův kritérium kondenzátu pro 1. stupeň
$\vartheta'_5 = 11,7 \cdot 10^{-4}$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Měrný objem syté kapaliny pro 1. stupeň
$\vartheta''_5 = 0,1032$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Měrný objem syté páry pro 1. stupeň

Fyzikální konstanty přehřívání páry

$\overline{g}_1 = 0,6746$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$	Střední měrný objem páry v 1. stupni
$\overline{\nu}_1 = 9,72 \cdot 10^{-6}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Střední kinematická viskozita páry v 1. stupni
$\overline{\lambda}_1 = 0,0302$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Střední tepelná vodivost páry v 1. stupni
$\overline{\text{Pr}}_1 = 1,18$	[1]	Střední hodnota Prandtlova kritéria páry v 1. stupni

4.2.2 VLASTNÍ TEPELNÝ VÝPOČET PRVNÍHO STUPNĚ PŘIHRÍVAČE

Při výpočtu vycházím především z literatury [2], [3] a [4]

Stanovení tepelného výkonu prvního stupně:

$$Q_1 = \dot{m}_1 \cdot (i_2 - i_1) \quad [\text{W}] \quad (1)$$

$$Q_1 = 88,89 \cdot (2853 \cdot 10^3 - 2751 \cdot 10^3) \quad [\text{W}]$$

$$Q_1 = 9,07 \quad [\text{MW}]$$

Stanovení množství ohřívající páry pro 1. stupeň

$$\dot{m}_4 = \frac{Q_1}{i_4 - i_5} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

$$\dot{m}_4 = \frac{9,07 \cdot 10^6}{2911 \cdot 10^3 - 859 \cdot 10^3} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\dot{m}_4 = 4,42 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

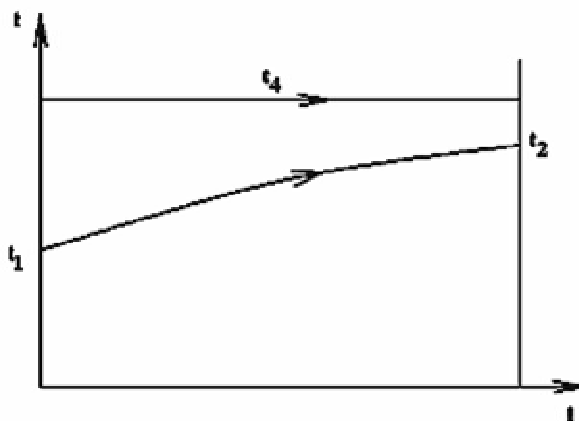
Stanovení středního logaritmického spádu 1. stupně

Vzhledem k tomu, že přehřívač páry je rekuperativním výměníkem, je možné střední logaritmický spád počítat dle následujícího vztahu. Vztah byl odvozen z průběhu teplot podle obr. 4.2 a [4].

$$\Delta t_1 = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{t_4 - t_1}{t_4 - t_2}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

$$\Delta t_1 = \frac{186,2 - 133}{\ln \frac{216 - 133}{216 - 186,2}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_1 = 51,94 \quad [^{\circ}\text{C}]$$



obr. 4.2 průběh teplot ve výměníku – podle [3]

Stanovení středního tlaku a střední teploty v 1. stupni

$$\bar{p}_1 = \frac{p_1 + p_2}{2} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

$$\bar{p}_1 = \frac{0,2972 + 0,288}{2} \quad [\text{MPa}]$$

$$\bar{p}_1 = 0,2926 \quad [\text{MPa}]$$

$$\bar{t}_1 = t_3 - \Delta t_1 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5)$$

$$\bar{t}_1 = 216 - 51,94 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$\bar{t}_1 = 164,06 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Na základě těchto hodnot byly z tabulek z literatury [4] odečteny hodnoty fyzikálních konstant přehřívání páry uvedené v kapitole 4.3.1.

Konstrukční konstanty – podle [3]

$d_1 = 0,016$	[m]	vnější průměr ožebrované trubky
$d_2 = 0,012$	[m]	vnitřní průměr ožebrované trubky
$h = 0,0085$	[m]	výška žebra
$n = 12$	[1]	počet žeber na jedné trubce
$l = 0,02$	[m]	rozvin délky koryta vytvořeného žebry
$\delta = 0,0008$	[m]	tloušťka žebra
$z = 37$	[1]	počet trubek v jedné kazetě
$z_1 = 30$	[1]	počet kazet v 1. stupni
$l_k = 0,129$	[m]	teoretická strana kazety
$L_{tr} = 1,9$	[m]	délka ožebrované části trubky

S ohledem na výkon zařízení volím počet kazet z_1 pro první stupeň 30 a délku ožebrované části trubky L_{tr} 1,9 m.

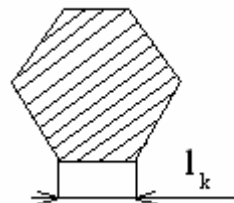
Stanovení teoretického průřezu kazety pro průchod přehřívané páry

Teoretický průřez šestiúhelníku uvedený na obr. 4.3 se stanoví dle následujícího vztahu:

$$S_{kt} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot l_k^2 \quad [m^2] \quad (6)$$

$$S_{kt} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{2} \cdot 0,129^2 \quad [m^2]$$

$$S_{kt} = 0,004323 \quad [m^2]$$



obr. 4.3 Průřez kazety přehříváče

Stanovení skutečného průřezu kazety pro průchod přehřívané páry

$$S_{ks} = S_{kt} - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot z - l \cdot \delta \cdot z \cdot \frac{n}{2} - 3 \cdot f_c \quad [m^2] \quad (7)$$

$$S_{ks} = 0,04323 - \frac{\pi \cdot 0,016^2}{4} \cdot 37 - 0,02 \cdot 0,0008 \cdot 37 \cdot \frac{12}{2} - 3 \cdot 0,000152 \quad [m^2]$$

$$S_{ks} = 0,03178 \quad [m^2]$$

kde $f_c = 0,000152 \quad [m^2]$...průřez krycích plechů podle [3]

Stanovení počtu trubek v 1. stupni

$$n_{tr1} = z \cdot z_1 \quad [1] \quad (8)$$

$$n_{tr1} = 37 \cdot 30 \quad [1]$$

$$n_{tr1} = 1110 \quad [1]$$

Stanovení hodnoty omývaného obvodu 1. stupně

$$u_1 = u_{p1} + \pi \cdot d_1 \cdot n_{tr1} + 2 \cdot \pi \cdot h \cdot n_{tr1} + u_{d1} \cdot z_1 \quad [m] \quad (9)$$

$$u_1 = 22,026 + \pi \cdot 0,016 \cdot 1110 + 2 \cdot \pi \cdot 0,0085 \cdot 1110 + 0,456 \cdot 30 \quad [m]$$

$$u_1 = 150,78 \quad [m]$$

kde $u_{p1} = 22,026 \quad [m]$...omývaný obvod přepážek – podle [3]

$u_{d1} = 0,456 \quad [m]$...omývaný obvod desek – podle [3]

Stanovení ekvivalentního průměru pro 1. stupeň

$$d_{e1} = \frac{4 \cdot S_{ks} \cdot z_1}{u_1} \quad [m] \quad (10)$$

$$d_{e1} = \frac{4 \cdot 0,03178 \cdot 30}{150,78} \quad [m]$$

$$d_{e1} = 0,02529 \quad [m]$$

Stanovení střední rychlosti přehřívání páry v 1. stupni – podle [2]

$$\bar{w}_1 = \frac{\dot{m}_1 \cdot \bar{g}_1}{z_1 \cdot S_{ks}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (11)$$

$$\bar{w}_1 = \frac{88,89 \cdot 0,6746}{30 \cdot 0,03178} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$\bar{w}_1 = 62,896 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Stanovení střední hodnoty Reynoldsova kritéria přehřívání páry v 1. stupni

$$Re_1 = \frac{\bar{w}_1 \cdot d_{e1}}{\nu_1} \quad [1] \quad (12)$$

$$Re_1 = \frac{62,896 \cdot 0,02529}{9,72 \cdot 10^{-6}} \quad [1]$$

$$Re_1 = 163983,49$$

Stanovení střední hodnoty Nusseltova kritéria přehřívání páry v 1. stupni

Odvozeno podle [4] na základě hodnoty vypočteného Re_1 kritéria.

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot \overline{Pr}_1^{0,43} \quad [1] \quad (13)$$

$$Nu_1 = 0,021 \cdot 163983,49^{0,8} \cdot 1,18^{0,43} \quad [1]$$

$$Nu_1 = 334,94 \quad [1]$$

Stanovení teoretické hodnoty součinitele přestupu tepla na straně přehřívání páry pro 1. stupeň

$$\alpha_{1t} = \frac{Nu_1 \cdot \bar{\lambda}_1}{d_{e1}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (14)$$

$$\alpha_{1t} = \frac{334,94 \cdot 0,0302}{0,02529} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_{1t} = 399,97 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Stanovení skutečné hodnoty součinitele přestupu tepla na straně přehřívání páry pro 1. stupeň

$$\alpha_1 = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E_1 \cdot \mu_1 + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\alpha_{1t} \cdot \psi_1}{1 + \varepsilon_1 \cdot \psi_1 \cdot \alpha_{1t}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (15)$$

kde S [m^2] plocha ožebrované části trubky v 1. stupni
 S_h [m^2] plocha hladké části trubek v 1. stupni
 S_z [m^2] plocha žebířů v 1. stupni
 E_1 [1] koeficient efektivnosti žebířů pro 1. stupeň – podle [] je tento parametr roven hodnotě 0,79

μ_1 [1]	koeficient rozšíření žebra k základu – podle [1] j tento parametr roven hodnotě 1
ψ_1 [1]	koeficient nerovnoměrnosti přestupu tepla na povrchu žebra – podle [1] je tento parametr roven hodnotě 0,9
ε_1 [1]	koeficient znečištění – podle [1] je tento parametr roven hodnotě 0

Dále podle [3] výpočet poměrů $\frac{S_z}{S}, \frac{S_h}{S}$:

$$\frac{S_z}{S} = \frac{2 \cdot n \cdot h \cdot L_{tr}}{(\pi \cdot d_1 + 2 \cdot n \cdot h) \cdot L_{tr}} \quad [1] \quad (16)$$

$$\frac{S_z}{S} = \frac{2 \cdot 12 \cdot 0,0085 \cdot 1,9}{(\pi \cdot 0,016 + 2 \cdot 12 \cdot 0,0085) \cdot 1,9} \quad [1]$$

$$\frac{S_z}{S} = 0,802311 \quad [1]$$

$$\frac{S_h}{S} = 1 - \frac{S_z}{S} \quad [1] \quad (17)$$

$$\frac{S_h}{S} = 1 - 0,802311 \quad [1]$$

$$\frac{S_h}{S} = 0,198 \quad [1]$$

A následně dosazením do vztahu (15):

$$\alpha_1 = (0,802311 \cdot 79 \cdot 1 + 0,198) \cdot \frac{399,97 \cdot 0,9}{1 + 0} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_1 = 299,43 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Stanovení střední hodnoty měrného tepelného toku v 1. stupni

$$q_1 = \frac{Q_1}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{tr1} \cdot L_{tr}} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (18)$$

$$q_1 = \frac{9,07 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,012 \cdot 1110 \cdot 1,9} \quad [W \cdot m^{-2}]$$

$$q_1 = 114077,39 \quad [W \cdot m^{-2}]$$

Stanovení hodnoty Reynoldsova kritéria ohřívající páry pro 1. stupeň

$$Re_2 = \frac{2 \cdot q_1 \cdot L_{tr}}{\mu_1 \cdot l_{v1}} \quad [1] \quad (19)$$

$$Re_2 = \frac{2 \cdot 114077,39 \cdot 1,9}{134,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1917,2 \cdot 10^3} \quad [1]$$

$$Re_2 = 1681,1 \quad [1]$$

Stanovení hodnoty Nusseltova kritéria ohřívající páry pro 1. stupeň

Odvozeno podle [2] na základě hodnoty vypočteného Re_2 kritéria.

$$Nu_2 = 0,14 \cdot Re_2^{0,7} \cdot Pr_5^{0,35} \cdot \left(\frac{g_5''}{g_5'} \right)^{0,35} \quad [1] \quad (20)$$

$$Nu_2 = 0,14 \cdot 1681,1^{0,7} \cdot 0,9236^{0,35} \cdot \left(\frac{0,1032}{0,00117} \right)^{0,35} \quad [1]$$

$$Nu_2 = 118,27 \quad [1]$$

Stanovení součinitele přestupu tepla na straně ohřívající páry v 1. stupni

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_5}{d_2} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (21)$$

$$\alpha_2 = \frac{118,27 \cdot 66,02 \cdot 10^{-2}}{0,012} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_2 = 6506,82 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Stanovení prostupu tepla v 1. stupni

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot \varphi_1} + \frac{\delta \cdot d_1}{\lambda_{tr1} \cdot \bar{d}_1} + \frac{d_1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (22)$$

kde φ_1 [1] ...koeficient ožebrování

\bar{d}_1 [m] ...střední průměr trubky

λ_{tr1} [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]...tepelná vodivost materiálu ožebrovaných trubek – materiál

ocel 12022, λ_{tr1} odečtena z tabulek při střední teplotě \bar{t}_1

Dále výpočet koeficientu ožebrování φ_1 a středního průměru \bar{d}_1 dle [3]:

$$\varphi_1 = \frac{d_1 + 2 \cdot n \cdot h}{d_1} \quad [1] \quad (23)$$

$$\varphi_1 = \frac{0,016 + 2 \cdot 12 \cdot 0,0085}{0,016} \quad [1]$$

$$\varphi_1 = 13,75 \quad [1]$$

$$\bar{d}_1 = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [m] \quad (24)$$

$$\bar{d}_1 = \frac{0,016 + 0,012}{2} \quad [m]$$

$$\bar{d}_1 = 0,014 \quad [m]$$

A následným dosazením do vztahu (22):

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{299,43 \cdot 13,75} + \frac{0,0008 \cdot 0,016}{46,2 \cdot 0,014} + \frac{0,016}{6506,82 \cdot 0,012}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$k_1 = 2138,63 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Stanovení výpočtové plochy ohřevu 1. stupně

$$H_{v1} = \frac{Q_1}{k_1 \cdot \Delta t_1} \quad [m^2] \quad (25)$$

$$H_{v1} = \frac{9,07 \cdot 10^6}{2138,63 \cdot 51,94} \quad [m^2]$$

$$H_{v1} = 81,65 \quad [m^2]$$

Stanovení výpočtové délky ožebrované trubky

$$L_{v1} = \frac{H_{v1}}{n_{tr1} \cdot \pi \cdot d_1} \quad [m] \quad (26)$$

$$L_{v1} = \frac{81,65}{1110 \cdot \pi \cdot 0,016} \quad [m]$$

$$L_{v1} = 1,46 \quad [m]$$

Stanovení skutečné plochy ohřevu v 1. stupni

$$H_{s1} = n_{tr1} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L_{tr} \quad [m^2] \quad (27)$$

$$H_{s1} = 1110 \cdot \pi \cdot 0,016 \cdot 1,9 \quad [m^2]$$

$$H_{s1} = 106,01 \quad [m^2]$$

Stanovení teoretické hodnoty koeficientu rezervní plochy

$$k_{r1} = \frac{H_{s1} - H_{v1}}{H_{v1}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (28)$$

$$k_{r1} = \frac{106,01 - 81,65}{81,65} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$k_{r1} = 29,83 \quad [\%]$$

4.3 VÝPOČET DRUHÉHO STUPNĚ PŘIHRÍVAČE

Zadané hodnoty:

$p_2 = 0,288$	[Mpa]	Tlak přehřívání páry na vstupu do 2. stupně
$t_2 = 186,2$	[°C]	Teplota přehřívání páry na vstupu do 2. stupně
$p_3 = 0,279$	[Mpa]	Tlak přehřívání páry na výstupu z 2. stupně
$t_3 = 241$	[°C]	Teplota přehřívání páry na výstupu z 2. stupně
$p_6 = 4,22$	[Mpa]	Tlak ohřívající páry pro 2. stupeň
$t_6 = 263$	[°C]	Teplota ohřívající páry pro 2. stupeň
$m_1 = 88,89$	[kg·s ⁻¹]	Množství vlhké páry vystupující ze separátoru

4.3.1 HODNOTY ODEČTENÉ Z TABULEK

Entalpie páry pro druhý stupeň

$i_2 = 2853$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie přehřívání páry na vstupu do 2. stupně
$i_3 = 2960$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie přehřívání páry na výstupu z 2. stupně
$i_6 = 3003$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie ohřívající páry pro 2. stupeň
$i_7 = 1136,6$	[kJ·kg ⁻¹]	Entalpie kondenzátu ohřívající páry pro 2. stupeň

Fyzikální konstanty ohřívající páry:

$\eta_7 = 105,7 \cdot 10^{-6}$	[Pa·s]	Dynamická viskozita kondenzátu pro 2. stupeň
$l_{v7} = 1695,6$	[kJ·kg ⁻¹]	Výparné teplo kondenzátu pro 2. stupeň
$\lambda_7 = 60,5 \cdot 10^{-2}$	[kJ·kg ⁻¹]	Tepelná vodivost kondenzátu pro 2. stupeň
$Pr_7 = 0,9477$	[1]	Prandtlův kritérium kondenzátu pro 2. stupeň
$\vartheta_7' = 12,5 \cdot 10^{-4}$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Měrný objem syté kapaliny pro 2. stupeň
$\vartheta_7'' = 0,04975$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Měrný objem syté páry pro 2. stupeň

Fyzikální konstanty přehřívání páry

$\bar{v}_2 = 0,804$	[m ³ ·kg ⁻¹]	Střední měrný objem páry ve 2. stupni
$\bar{\nu}_1 = 13,5 \cdot 10^{-6}$	[m ² ·s ⁻¹]	Střední kinematická viskozita páry ve 2. stupni
$\bar{\lambda}_1 = 0,039$	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Střední tepelná vodivost páry ve 2. stupni
$\bar{Pr}_1 = 1,46$	[1]	Střední hodnota Prandtlůva kritéria páry v 2. stupni

4.3.2 VLASTNÍ TEPELNÝ VÝPOČET DRUHÉHO STUPNĚ PŘIHRÍVAČE

Stanovení tepelného výkonu 2. stupně:

$$Q_2 = \dot{m}_1 \cdot (i_3 - i_2) \quad [W] \quad (29)$$

$$Q_2 = 88,89 \cdot (2960 \cdot 10^3 - 2853 \cdot 10^3) \quad [W]$$

$$Q_2 = 9,51 \quad [MW]$$

Stanovení množství ohřívající páry pro 2. stupeň

$$\dot{m}_6 = \frac{Q_2}{i_6 - i_7} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (30)$$

$$\dot{m}_6 = \frac{9,51 \cdot 10^6}{3003 \cdot 10^3 - 1136,6 \cdot 10^3} \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

$$\dot{m}_6 = 5,095 \quad [kg \cdot s^{-1}]$$

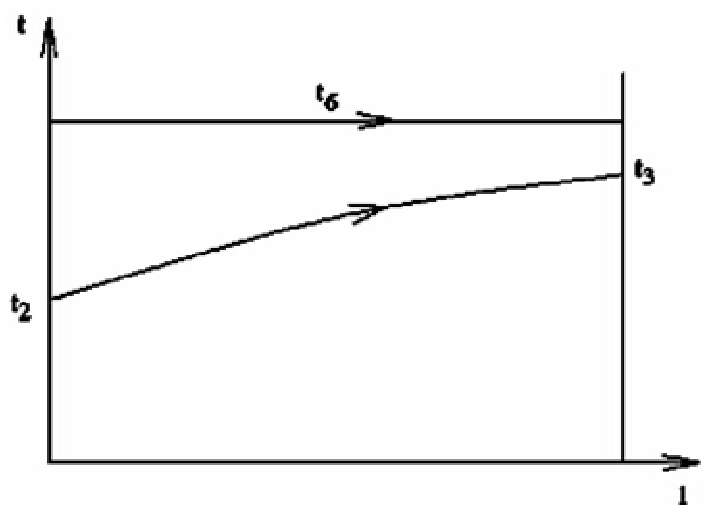
Stanovení středního logaritmického spádu 2. stupně

Následující vztah byl odvozen dle obr. 4.4 pro průběh teplot v rekuperativním výměníku a za pomoci literatury [4].

$$\Delta t_2 = \frac{t_3 - t_2}{\ln \frac{t_6 - t_2}{t_6 - t_3}} \quad [^{\circ}C] \quad (31)$$

$$\Delta t_2 = \frac{241 - 186,2}{\ln \frac{263 - 186,2}{263 - 241}} \quad [^{\circ}C]$$

$$\Delta t_2 = 43,83 \quad [^{\circ}C]$$



obr. 4.4 průběh teplot ve výměníku – podle [3]

Stanovení středního tlaku a střední teploty ve 2. stupni

$$\bar{p}_2 = \frac{p_2 + p_3}{2} \quad [MPa] \quad (32)$$

$$\bar{p}_2 = \frac{0,288 + 0,279}{2} \quad [MPa]$$

$$\bar{p}_2 = 0,2835 \quad [MPa]$$

$$\bar{t}_2 = t_6 - \Delta t_2 \quad [^{\circ}C] \quad (33)$$

$$\bar{t}_2 = 263 - 43,83 \quad [^{\circ}C]$$

$$\bar{t}_2 = 219,17 \quad [^{\circ}C]$$

Na základě těchto hodnot byly z tabulek odečteny hodnoty fyzikálních konstant přehřívání páry uvedené v kapitole 4.3.1.

Konstrukční konstanty

Zůstávají stejné jako pro 1. stupeň přehříváče, rozdíl je pouze u počtu kazet ve 2. stupni, který je 29.

$d_1 = 0,016$	[m]	vnější průměr ožebrované trubky
$d_2 = 0,012$	[m]	vnitřní průměr ožebrované trubky
$h = 0,0085$	[m]	výška žebra
$n = 12$	[1]	počet žeber na jedné trubce
$l = 0,02$	[m]	rozvin délky koryta vytvořeného žebry
$\delta = 0,0008$	[m]	tloušťka žebra
$z = 37$	[1]	počet trubek v jedné kazetě
$z_2 = 29$	[1]	počet kazet v 1. stupni
$l_k = 0,129$	[m]	teoretická strana kazety
$L_{tr} = 1,9$	[m]	délka ožebrované části trubky

Stanovení teoretického a skutečného průřezu kazety pro průchod přehřívané páry ve 2. stupni

Výpočet teoretického a skutečného průřezu kazety byl proveden v kapitole 4.2.2 podle vztahů (6) a (7). Vzhledem k tomu, že kazety ve druhém stupni jsou stejné jako kazety v prvním stupni je teoretický průřez kazety S_{kt} a skutečný průřez kazety S_{ks} roven:

$$S_{kt} = 0,004323 \quad [m^2]$$

$$S_{ks} = 0,03178 \quad [m^2]$$

Stanovení počtu trubek ve 2. stupni

$$n_{tr2} = z \cdot z_2 \quad [1] \tag{34}$$

$$n_{tr2} = 37 \cdot 29 \quad [1]$$

$$n_{tr2} = 1073 \quad [1]$$

Stanovení hodnoty omývaného obvodu 2. stupně

$$u_2 = u_{p2} + \pi \cdot d_1 \cdot n_{tr2} + 2 \cdot \pi \cdot h \cdot n_{tr2} + u_{d1} \cdot z_2 \quad [m] \tag{35}$$

kde $u_{p2} = 22,026 \quad [m]$...omývaný obvod přepážek – podle [3]

$u_{d1} = 0,456 \quad [m]$...omývaný obvod desek – podle [3]

$$u_2 = 9,4 + \pi \cdot 0,016 \cdot 1073 + 2 \cdot \pi \cdot 0,0085 \cdot 1073 + 0,456 \cdot 29 \quad [m]$$

$$u_2 = 133,86 \quad [m]$$

Stanovení ekvivalentního průměru pro 2. stupeň

$$d_{e2} = \frac{4 \cdot S_{ks} \cdot z_2}{u_2} \quad [m] \quad (36)$$

$$d_{e2} = \frac{4 \cdot 0,03178 \cdot 29}{133,86} \quad [m]$$

$$d_{e2} = 0,02754 \quad [m]$$

Stanovení střední rychlosti přehřívané páry ve 2. stupni

$$\bar{w}_2 = \frac{\dot{m}_1 \cdot \bar{g}_2}{z_2 \cdot S_{ks}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (37)$$

$$\bar{w}_2 = \frac{88,89 \cdot 0,804}{29 \cdot 0,03178} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

$$\bar{w}_2 = 77,55 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Stanovení střední hodnoty Reynoldsova kritéria přehřívané páry ve 2. stupni

$$Re_3 = \frac{\bar{w}_2 \cdot d_{e2}}{\nu_2} \quad [1] \quad (38)$$

$$Re_3 = \frac{77,55 \cdot 0,02754}{13,5 \cdot 10^{-6}} \quad [1]$$

$$Re_3 = 158202 \quad [1]$$

Stanovení střední hodnoty Nusseltova kritéria přehřívané páry ve 2. stupni

Vztah pro výpočet Nu_3 kritéria byl odvozen podle výše vypočtené hodnoty Re_3 kritéria a podle [4].

$$Nu_3 = 0,021 \cdot Re_3^{0,8} \cdot \bar{Pr}_2^{-0,43} \quad [1] \quad (39)$$

$$Nu_3 = 0,021 \cdot 158202^{0,8} \cdot 1,46^{0,43} \quad [1]$$

$$Nu_3 = 356,65 \quad [1]$$

Stanovení teoretické hodnoty součinitele přestupu tepla na straně přehřívání páry pro 2. stupeň

$$\alpha_{3t} = \frac{Nu_3 \cdot \bar{\lambda}_2}{d_2} \left[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right] \quad (40)$$

$$\alpha_{3t} = \frac{356,65 \cdot 0,039}{0,02754} \left[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right]$$

$$\alpha_{3t} = 505,06 \left[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right]$$

Stanovení skutečné hodnoty součinitele přestupu tepla na straně přehřívání páry pro 2. stupeň

$$\alpha_3 = \left(\frac{S_z}{S} \cdot E_2 \cdot \mu_1 + \frac{S_h}{S} \right) \cdot \frac{\alpha_{3t} \cdot \psi_1}{1 + \varepsilon_1 \cdot \psi_1 \cdot \alpha_{3t}} \left[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right] \quad (41)$$

kde	$S \text{ [m}^2\text{]}$	plocha ožebrované části trubky v 2. stupni
	$S_h \text{ [m}^2\text{]}$	plocha hladké části trubek v 2. stupni
	$S_z \text{ [m}^2\text{]}$	plocha žebra v 2. stupni
	$E_2 \text{ [1]}$	koeficient efektivnosti žebra pro 2. stupeň – podle [1] je tento parametr roven hodnotě 0,8
	$\mu_1 \text{ [1]}$	koeficient rozšíření žebra k základu – podle [1] j tento parametr roven hodnotě 1
	$\psi_1 \text{ [1]}$	koeficient nerovnoměrnosti přestupu tepla na povrchu žebra – podle [1] je tento parametr roven hodnotě 0,9
	$\varepsilon_1 \text{ [1]}$	koeficient znečištění – podle [1] je tento parametr roven hodnotě 0

Dále podle [3] výpočet poměrů $\frac{S_z}{S}, \frac{S_h}{S}$ odpovídá hodnotám vypočteným v kapitole 4.2.2 dle vztahu (16) a (17) :

$$\frac{S_z}{S} = 0,802311 \text{ [1]}$$

$$\frac{S_h}{S} = 0,198 \text{ [1]}$$

A následně dosazením do vztahu (41):

$$\alpha_3 = (0,802311 \cdot 0,8 \cdot 1 + 0,198) \cdot \frac{505,06 \cdot 0,9}{1 + 0} \left[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right]$$

$$\alpha_3 = 381,76 \left[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \right]$$

Stanovení střední hodnoty měrného tepelného toku ve 2. stupni

$$q_2 = \frac{Q_2}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{tr2} \cdot L_{tr}} \left[W \cdot m^{-2} \right] \quad (42)$$

$$q_2 = \frac{9,51 \cdot 10^6}{\pi \cdot 0,012 \cdot 1073 \cdot 1,9} \left[W \cdot m^{-2} \right]$$

$$q_2 = 123736 \left[W \cdot m^{-2} \right]$$

Stanovení hodnoty Reynoldsova kritéria ohřívající páry pro 2. stupeň

$$Re_4 = \frac{2 \cdot q_2 \cdot L_{tr}}{\eta_2 \cdot l_{v2}} \quad [1] \quad (43)$$

$$Re_4 = \frac{2 \cdot 123736 \cdot 1,9}{105,7 \cdot 10^{-6} \cdot 1695,6 \cdot 10^3} \quad [1]$$

$$Re_4 = 2623,5 \quad [1]$$

Stanovení hodnoty Nusseltova kritéria ohřívající páry pro 2. stupeň

Odvozeno podle [2] na základě hodnoty vypočteného Re_4 kritéria.

$$Nu_4 = 0,14 \cdot Re_4^{0,7} \cdot Pr_7^{0,35} \cdot \left(\frac{g''}{g'} \right)^{0,35} \quad [1] \quad (43)$$

$$Nu_4 = 0,14 \cdot 2623,5^{0,7} \cdot 0,9447^{0,35} \cdot \left(\frac{0,04975}{0,00125} \right)^{0,35} \quad [1]$$

$$Nu_4 = 123,21 \quad [1]$$

Stanovení součinitele přestupu tepla na straně ohřívající páry ve 2. stupni

$$\alpha_4 = \frac{Nu_4 \cdot \lambda_7}{d_2} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (44)$$

$$\alpha_4 = \frac{123,21 \cdot 60,5 \cdot 10^{-2}}{0,012} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$\alpha_4 = 6211,99 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Stanovení prostupu tepla ve 2. stupni

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_3 \cdot \varphi_1} + \frac{\delta \cdot d_1}{\lambda_{tr2} \cdot \bar{d}_1} + \frac{d_1}{\alpha_4 \cdot d_2}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (45)$$

kde φ_1 [1] ...koeficient ožebrování

\bar{d}_1 [m] ...střední průměr trubky

λ_{tr2} [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]...tepelná vodivost materiálu ožebrovaných trubek. Jako materiál byla použita ocel 12022 a při teplotě \bar{t}_2 je $\lambda_{tr2} = 46,2$ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Koeficient ožebrování φ_1 a střední průměr trubky byly vypočteny v kapitole 4.2.2 podle vztahů (23) a (24) a jejich hodnoty jsou rovny:

$$\varphi_1 = 13,75 \quad [1]$$

$$\bar{d}_1 = 0,014 \quad [m]$$

A následným dosazením do vztahu (45):

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{381,76 \cdot 13,75} + \frac{0,0008 \cdot 0,016}{46,2 \cdot 0,014} + \frac{0,016}{6211,99 \cdot 0,012}} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

$$k_2 = 2353,3 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Stanovení výpočtové plochy ohřevu 2. stupně

$$H_{v2} = \frac{Q_2}{k_2 \cdot \Delta t_2} \quad [m^2] \quad (46)$$

$$H_{v2} = \frac{9,51 \cdot 10^6}{2353,3 \cdot 43,83} \quad [m^2]$$

$$H_{v2} = 92,2 \quad [m^2]$$

Stanovení výpočtové délky ožebrované trubky 2. stupně

$$L_{v2} = \frac{H_{v2}}{n_{tr2} \cdot \pi \cdot d_1} \quad [m] \quad (47)$$

$$L_{v2} = \frac{92,2}{1073 \cdot \pi \cdot 0,016} \quad [m]$$

$$L_{v2} = 1,71 \quad [m]$$

Stanovení skutečné plochy ohřevu ve 2. stupni

$$H_{s2} = n_{tr2} \cdot \pi \cdot d_1 \cdot L_{tr} \quad [m^2] \quad (48)$$

$$H_{s2} = 1073 \cdot \pi \cdot 0,016 \cdot 1,9 \quad [m^2]$$

$$H_{s2} = 102,48 \quad [m^2]$$

Stanovení teoretické hodnoty koeficientu rezervní plochy pro 2. stupeň

$$k_{r2} = \frac{H_{s2} - H_{v2}}{H_{v2}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (49)$$

$$k_{r2} = \frac{102,48 - 92,2}{92,2} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$k_{r2} = 11,15 \quad [\%]$$

5. ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se zabýval návrhem vertikálních a horizontálních separátorů a přehříváčů pro jaderné elektrárny III+ generace středních a vyšších výkonů. V úvodní části byl proveden rozbor problematiky týkající se zvyšování nároků na výrobu elektrické energie, kde jako výhodné řešení současné i budoucí energetické situace se ukázala jaderná energetika. Ovšem aby byla zajištěna efektivnost a hospodárnost výroby energie, je potřeba věnovat zvýšenou pozornost jednotlivým zařízením v jaderné elektrárně. Jedním z těchto zařízení je také SPP, o němž pojednávala celá tato práce. Byla zde rozebrána problematika expanze mokré páry v turbíně a vliv vlhkosti v páře na termodynamickou účinnost turbíny a účinnost celého parního cyklu a problematika korozního a erozního působení vodních kapek na lopatky turbíny. Dále byly popsány jednotlivé druhy separátorů a přehříváčů včetně obrázkového doprovodu a uvedeno jejich použití na základních typech kombinovaných horizontálních a vertikálních SPP používajících se na současných českých i zahraničních jaderných elektrárnách.

Druhá část této práce byla orientována na tepelný výpočet zadaného vertikálního SPP pro jaderné elektrárny o výkonu 70 MWe. Tepelný výpočet zahrnoval stanovení koeficientu rezervní plochy k_r [%] pro první a druhý stupeň přehříváče. Dle platných vztahů byly vypočteny součinitele prostupu tepla potřebné pro stanovení výpočtové a skutečné plochy ohřevu stupně přehříváče a následně koeficientu rezervní plochy. V prvním stupni přehříváče byla vypočtena hodnota $k_{r1} = 29,83$ [%], pro druhý stupeň hodnota $k_{r2} = 11,15$ [%]. Vzhledem k tomu, že tato rezerva slouží pro případnou opravu částí přehříváče a její minimální hodnota musí dosahovat alespoň 10 %, jsou vypočtené hodnoty v obou stupních dostačující a SPP odpovídá stanoveným požadavkům pro chod zařízení.

Součástí práce je také výkresová dokumentace kazety přehříváče a schématické zapojení SPP do oběhu s parní turbínou.

Poděkování:

Na závěr své práce považuji za milou povinnost poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za jeho cenné rady a odborné vedení během mé práce.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZVARA, J.: *Separátory a přehříváče pary pro jadrové elektrárny*, Edičné stredisko SVŠT v Bratislavě, 1976, 82 s.
- [2] KOLAT, P : *Přenos tepla a hmoty*, skripta VŠB-TU Ostrava, 1986, 266 s.
- [3] VÁLEČEK, R.: *Návrh separátoru a přehříváče páry pro jadernou elektrárnu PWR 500 MWe, diplomová práce*, Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava, 1988
- [4] Kadlec Z., *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. Edice SPBI , Ostrava, 2009, 100 s. ISNB 978-80-7385-061-6
- [5] Kadlec, Z.: *Termomechanika - návody do cvičení*, VŠB - TU Ostrava, 2001
- [6] Kuldásek, K.: *Návrh separátoru a přehříváče páry pro turbínu 1000 MWe tlakovodní jaderné elektrárny, diplomová práce*, Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava, 2008
- [7] JANEBA, B.: *Tepelné výpočty kotlů a parních generátorů*, ČVUT Praha, 1982
- [8] HEJZLAR, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren 1. díl*, skripta ČVUT Praha, 2005, ISBN 80-01-03190-6
- [9] VESECKÝ, R.: *Jaderné reaktory IV. generace, diplomová práce*, Fakulta elektrotechnická, ČVUT Praha, 2006

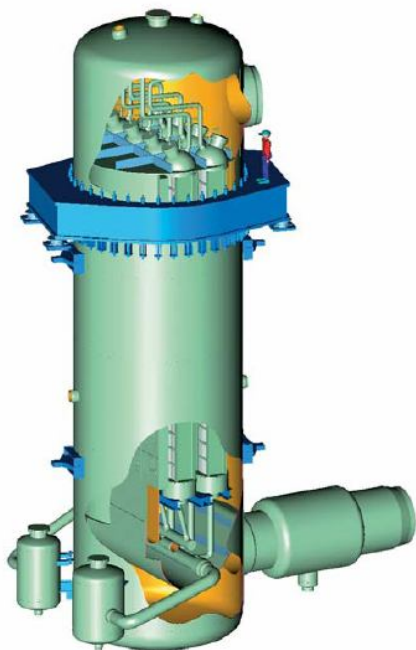
7. přílohy

Seznam příloh

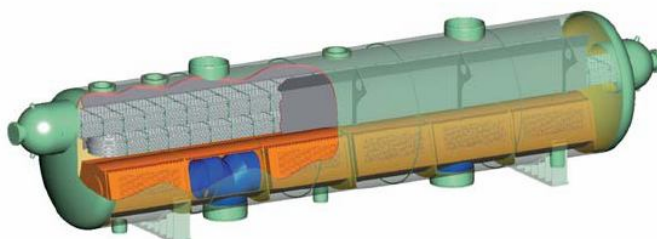
příloha	název
č.1	Obrázková dokumentace horizontálních a vertikálních SPP
č.2	Výkresová dokumentace kazety přihřívače
č.3	Schématické zapojení separátoru a přihřívače páry do oběhu

Příloha č. 1

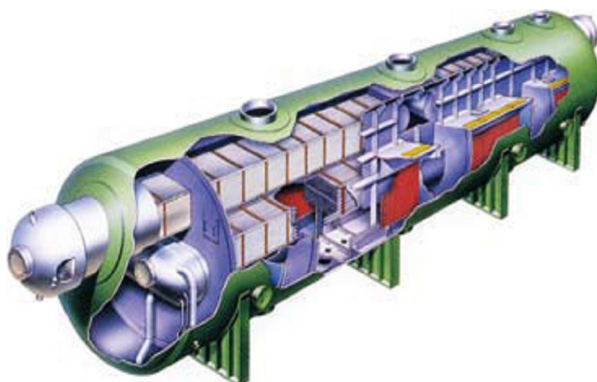
Vertikální typ systém BALCKE



Horizontální typ systém BALCKE



Horizontální typ SPP s použitím v závodě
MITSUBISHI v USA



Instalace nového vertikálního typu

